

УЧРЕЖДЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

В.М. Аульченко, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин,
В.В. Жуланов, Э.Р. Прууэл, Б.П. Толочко,
К.А. Тен, Л.И. Шехтман

ДЕТЕКТОР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ПУЧКЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ИЯФ 2009-22

НОВОСИБИРСК
2009

Детектор для изучения взрывных процессов на пучке синхротронного излучения

В.М.Аульченко^а, О.В.Евдоков^б, И.Л.Жогин^б, В.В.Жуланов^а,
Э.Р.Прууэл^б, Б.П.Толочко^б, К.А.Тен^б, Л.И.Шехтман^{а*}

^а *Институт ядерной физики им.Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия*

^б *Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия*

^в *Институт гидродинамики им.Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия*

Аннотация

Синхротронное излучение (СИ) дает уникальную возможность для изучения структуры вещества во время быстротекущих процессов. Поскольку СИ излучается сгустками электронов в накопительном кольце, длительность вспышки СИ, соответствующей одному сгустку может быть очень короткой. При наличии детектора, способного регистрировать СИ от одного сгустка и не смешивать сигналы от различных сгустков, появляется возможность получать информацию об изменении состояния вещества в изучаемом объекте с очень высоким временным разрешением. Детектор для изучения взрывных процессов на пучке СИ, DIMEX¹ был создан в Институте ядерной физики им.Будкера СО РАН. Детектор представляет собой ионизационную камеру высокого давления со считыванием сигнала при помощи полосковой структуры с шагом 0.1 мм. Время сбора электронной компоненты первичной ионизации составляет менее 50 нс, что существенно меньше периода обращения сгустка в накопителе ВЭПП-3 (250 нс). DIMEX наполнен смесью Хе-СО₂ (3-1) при абсолютном давлении 7 атм. Детектор имеет пространственное разрешение ~180 мкм и эффективность не менее 50% к излучению с энергией 20 кэВ. Динамический диапазон детектора составляет ~100, что дает возможность измерять сигнал с процентной точностью. При этом максимальный поток рентгеновских фотонов, при котором DIMEX работает в линейной области составляет около 10¹⁰ фот/кан·с. В настоящее время детектор используется для экспериментов по изучению эволюции плотности в детонационных волнах, а также для экспериментов по изучению процессов образования наночастиц методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) на накопителе ВЭПП-3.

© Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН

* Электронный адрес: L.I.Shekhtman@inp.nsk.su, тел.: (383)329-4992,
факс: (383)330-7163.

¹ Detector for Imaging of Explosions (Детектор для изучения взрывов (англ.)).

Введение

Синхротронное излучение представляет собой уникальный инструмент для изучения структуры вещества. Временная зависимость потока СИ определяется длиной и количеством электронных сгустков в накопителе. Так в накопителе ВЭПП-3 в ИЯФ СО РАН длина сгуска составляет ~ 30 см, период обращения равен 250 нс, так что в одно-сгустковом режиме СИ излучается импульсами с длительностью ~ 1 нс и периодом 250 нс. Интегральный поток СИ очень высок. Так на ВЭПП-3 плотность потока СИ из вигглера с полем 2 Т, при энергии электронов 2 ГэВ и токе 100 мА на расстоянии 20 м от источника составляет более 10^{12} фот/мм²·с учетом поглощения в выходном Ве окне толщиной 2 мм. При этом средняя энергия излучения близка к 20 кэВ. Такие параметры пучка дают возможность получить от одного сгуска плотность потока фотонов более 10^5 фот/мм², что позволяет делать рентгенографию, т.е. измерять коэффициент поглощения излучения в объекте, стоящем на пути пучка, (рентгеновскую плотность) с процентной точностью и с пространственным разрешением в ~ 100 мкм. Для осуществления такой методики необходим детектор, способный измерять распределение плотности потока фотонов с высокой эффективностью ($\sim 50\%$) и высоким пространственным разрешением (~ 100 мкм). При этом детектор должен успевать измерить сигнал от одного сгуска до прихода сигнала от следующего сгуска, а также сохранять сигнал от последовательности из нескольких десятков сгустков для изучения изменения объекта со временем. Такие параметры детектора позволяют также применить его для измерения малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) от одиночного сгуска и регистрировать изменение МУРР от времени. МУРР определяется флуктуациями электронной плотности в объекте и, фактически, дает возможность регистрировать образование и эволюцию наночастиц в изучаемом объекте.

В настоящей статье описывается детектор DIMEX, разработанный в ИЯФ СО РАН и предназначенный для изучения взрывных процессов на пучке СИ [1-3]. DIMEX регистрирует синхротронное излучение от отдельных сгустков и при этом не смешивает сигналы от последовательных сгустков. Детектор способен зарегистрировать 32 изображения, каждое из которых представляет собой массив из $256 \div 512$ координатных каналов (различные версии детектора имеют различное число каналов). DIMEX в настоящее время используется для проведения экспериментов на канале СИ на накопителе ВЭПП-3. В статье обсуждается также возможность применения DIMEX на накопителе ВЭПП-4М с более высокой энергией пучка СИ.

1. Устройство и порядок работы детектора

1.1. Устройство детектора

Детектор DIMEX представляет собой ионизационную камеру высокого давления со считывающей структурой из полосок с шагом 0.1 мм. Сколлимированный по вертикали пучок СИ попадает в чувствительный объем детектора через входное окно из углепластика или бериллия толщиной 1мм (в различных версиях детектора применялись различные материалы входного окна). В зависимости от типа эксперимента пучок имеет размер по вертикали от 0.1 мм до 1 мм и по горизонтали до 14 мм. Пучок СИ попадает в газовый объем между двумя параллельными электродами (рис.1): высоковольтным дрейфовым электродом, на который подается отрицательный потенциал, и полосковой считывающей плоскостью, полоски которой направлены параллельно направлению пучка.

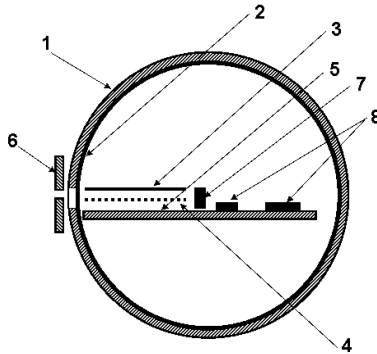


Рис. 1. Схема устройства детектора DIMEX: 1 – алюминиевый корпус со входным окном; 2 – вставка из углепластика толщиной 1 мм; 3 – дрейфовый электрод; 4 – ГЭУ; 5 – полосковая структура; 6 – входная диафрагма; 7 – защита электроники от излучения; 8 – чипы интеграторов и другие электронные компоненты.

Детектор наполнен смесью Xe-CO_2 (3-1) при абсолютном давлении 7 атм, глубина чувствительного объема в направлении пучка составляет 30 мм. Фотоны синхротронного излучения поглощаются в рабочем газе, образуя первичную ионизацию. Электроны первичной ионизации дрейфуют в сторону считывающей полосковой структуры, а положительные ионы, – в сторону дрейфового электрода. На пути дрейфа электронов на расстоянии 1.5 мм от полосковой структуры расположен газовый электронный умножитель (ГЭУ), который экранирует считывающую структуру от поля положительных ионов. ГЭУ представляет собой полимерную пленку (полиимид) толщиной 50 мкм с двусторонней металлизацией со сквозными отверстиями диаметром ~80 мкм, образующими регулярную гексагональную

структуру с шагом ~ 140 мкм [4,5] (рис.2). При подаче напряжения между металлизированными обкладками ГЭУ электроны в газе дрейфуют сквозь отверстия. В зависимости от величины электрического поля вне и внутри отверстий количество электронов может либо увеличиваться из-за ударной ионизации при дрейфе сквозь отверстия ГЭУ, либо уменьшаться из-за частичной нейтрализации при поглощении на верхней или нижней обкладках ГЭУ. В детекторе DIMEX выбран режим работы ГЭУ, при котором не происходит газового усиления, а, напротив, количество электронов при дрейфе сквозь ГЭУ уменьшается. После проникновения сквозь ГЭУ часть электронов продолжает дрейф в сторону полосковой структуры. При этом на полоски наводится заряд, который поступает на входы малолшумящих интеграторов, подключенных к каждой полоске. Поле положительных ионов полностью экранируется обкладками ГЭУ и не влияет на заряд, наводимый на полоски считывающей структуры.

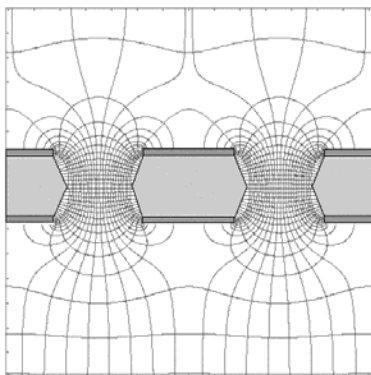


Рис. 2. Разрез структуры ГЭУ с изображением силовых линий электрического поля.

Следует отметить, что положительные ионы дрейфуют в ~ 1000 раз медленнее электронов и создают область высокой плотности объемного заряда в промежутке между плоскостью пучка СИ и дрейфовым электродом. При достаточно высокой плотности потока СИ этот объемный заряд может экранировать поле настолько, что меняется скорость дрейфа электронов, а также прозрачность ГЭУ.

1.2. Электроника и порядок работы детектора

Поскольку основной задачей детектора является быстрая регистрация сигнала от каждого электронного сгустка, была выбрана схема электроники, в которой сигнал записывается в аналоговую память во время эксперимента, а оцифровка и вычитывание происходят после окончания измерений. Каждая полоска считывающей структуры детектора подключена к входной площадке

чипа интеграторов APC128 [6]. APC128 представляет собой бескорпусной чип, содержащий 128 каналов, каждый из которых состоит из малошумящего интегратора на входе и 32 ячеек аналоговой памяти. Кроме того чип содержит выходной аналоговый мультиплексор, через который все каналы могут быть последовательно прочитаны. Максимальная частота записи и чтения аналоговой памяти составляет 10 МГц. Интегратор APC128 имеет 2 различных емкости обратной связи, которые дают возможность менять его чувствительность. Эквивалентный шумовой заряд интегратора не превышает 2000 электронов. Схема APC128 показана на рис.3.

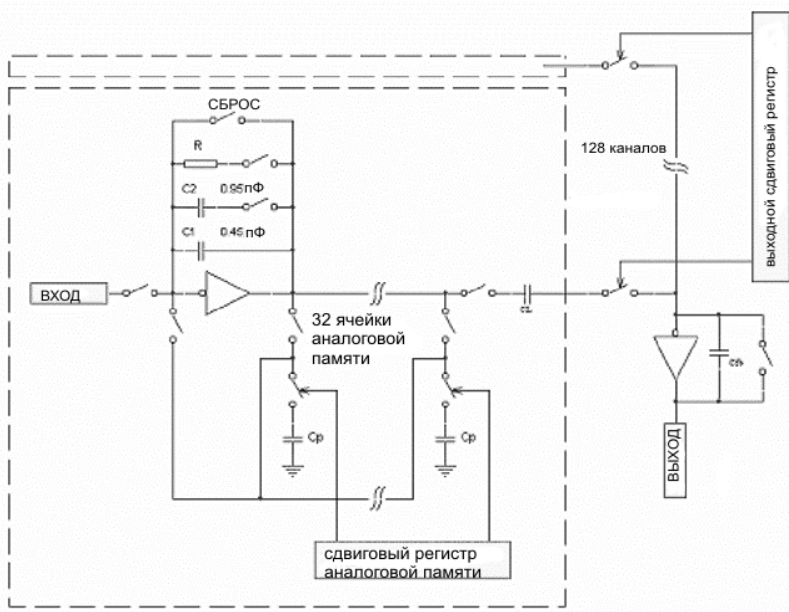


Рис. 3. Схема чипа интеграторов APC128.

После включения питания и загрузки программы, управляющей работой электроники детектора, запускается измерительный цикл. При этом каждая ячейка аналоговой памяти подключается к выходу интегратора, затем интегратор накапливает заряд, поступающий с полосы считывающей структуры, ячейка памяти отключается и емкость обратной связи интегратора очищается. После этого к выходу интегратора подключается следующая ячейка аналоговой памяти и т.д. При этом ячейки памяти записываются циклически, перезаписывая наиболее ранние по времени значения. Этот процесс происходит параллельно во всех каналах всех чипов. Таким образом, в каждый момент в аналоговой памяти находится информация о сигнале, накопленном в течение 32 отрезков времени, предшествующих настоящему моменту. Временная структура измеритель-

ного цикла определяется сигналом «CLOCK», который формируется из сигнала «ФАЗА» ускорителя, имеющего частоту 4 МГц. Сигнал «CLOCK» имеет частоту 40 МГц в первом варианте детектора и 160 МГц в последнем варианте. По сигналу «ЗАПУСК» можно остановить процесс записи ячеек памяти или продолжить цикл на фиксированное количество отрезков времени. Это дает гибкость в выборе способа синхронизации работы детектора и устройства, запускающего эксперимент (например, генератора детонационной волны в образце), так как в одних случаях сигнал «ЗАПУСК» формируется до интересующего события, а в других случаях – после.

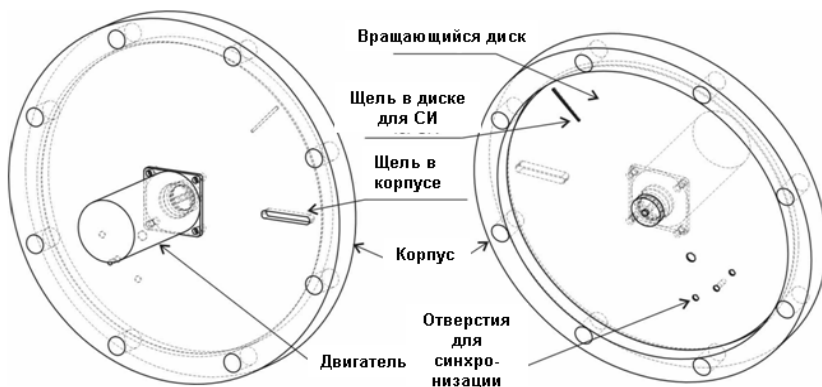


Рис. 4. Быстрый затвор.

Для уменьшения объемного заряда положительных ионов, накапливающихся в дрейфовом промежутке используется быстрый затвор, открывающий поток СИ только на время эксперимента. Затвор представляет собой вращающийся диск с узкой щелью с периодом обращения 18 мс (рис.4). Время открытия затвора составляет 60 мкс, что достаточно для проведения эксперимента. За время между двумя фазами открытия затвора положительные ионы успевают достичь дрейфового электрода. Для определения положения диска, в нем имеется три рядом расположенные отверстия, напротив которых по одну сторону диска расположен светодиод, по другую – фотодиод. При вращении диска в фотодиоде возникает серия из трех импульсов – по ним определяется момент прохождения щели через фотопару. По интервалу времени между двумя такими сериями определяется текущая скорость вращения диска. Сигнал с фотопары обрабатывается в контрольном блоке, где вычисляется время до следующей фазы открытия затвора. Из этого значения вычитается определенное время для компенсации задержки при генерации детонационной волны и распространении ее до области образца, облучаемой СИ. По истечении вычисленного времени формируется команда генератору импульса на детонатор.

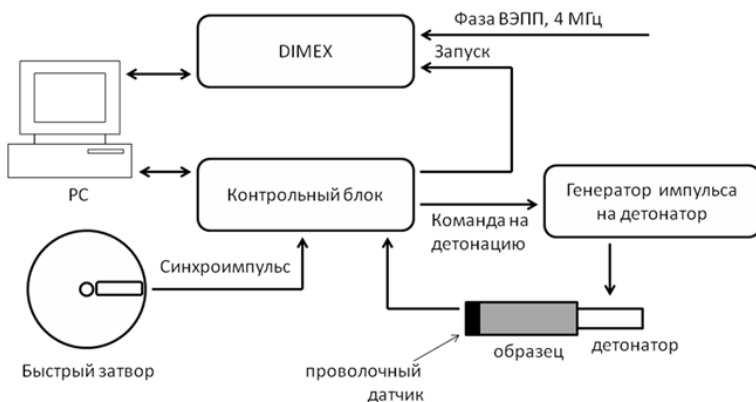


Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки станции «ВЗРЫВ».

На рис.5 показана блок-схема экспериментальной установки. Существенным элементом ее является контрольный блок, который управляет синхронизацией эксперимента. В первом варианте детектора он представлял собой специализированный блок в стандарте КАМАК, в последнем варианте контрольный блок интегрирован с детектором DIMEX. Управляющая последовательность при проведении эксперимента запускается оператором с компьютера. При этом программа в контрольном блоке ожидает очередную последовательность импульсов от быстрого затвора и формирует команду генератору импульса на детонатор с учетом времени срабатывания генератора и момента открытия быстрого затвора. Разброс времени между командой на генератор и формированием детонационной волны в образце более 10 мкс. Поэтому для более точной синхронизации сигнала «ЗАПУСК» детектора используется проволочный датчик, представляющий собой 2 параллельно расположенные проволочки. Проволочки замыкаются при прохождении ионизированной плазмы в детонационной волне. Этот датчик можно располагать таким образом, чтобы он срабатывал после интересующего события и не вносил возмущения в детонационную волну. При этом детектор останавливает цикл записи сразу по приходу сигналу «ЗАПУСК», сохраняя в аналоговой памяти информацию об интересующем событии. После остановки цикла записи программа, работающая в FPGA в детекторе DIMEX, запускает цикл чтения, по которому заряд из аналоговой памяти всех каналов APC128 считывается через выходной аналоговый мультиплексор, оцифровывается и буферизуется в памяти, расположенной на детекторе, после чего происходит пересылка всей информации через Ethernet-канал в компьютер (рис.6). Последний вариант детектора имеет 512 каналов (4 чипа APC128).

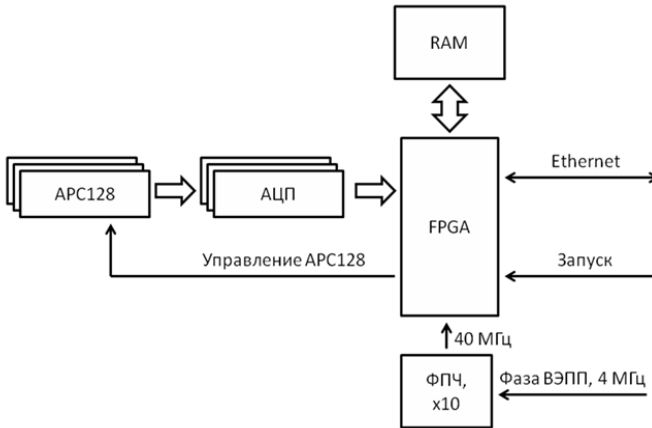


Рис. 6. Блок-схема электроники детектора DIMEX.

2. Характеристики детектора

Детектор должен обеспечивать измерение распределения потока рентгеновских фотонов с высокой точностью по координате и по величине. Кроме того, наиболее существенным свойством детектора DIMEX является его способность регистрировать сигнал, поступивший от очередного пролетевшего сгустка электронов, до пролета следующего сгустка. Таким образом, наиболее критическими параметрами детектора являются пространственное разрешение, точность измерения величины сигнала (отношение сигнал/шум и динамический диапазон), а также временное разрешение. При этом, поскольку поток фотонов от одного сгустка ограничен, важным свойством детектора является квантовая эффективность, которая должна быть достаточно высокой.

2.1. Пространственное разрешение, эффективность

Пространственное разрешение детектора определяется пробегами вторичных частиц, образующихся после поглощения рентгеновского кванта в рабочем газе (фото- и Оже-электронов, флуоресцентных фотонов), а также диффузией электронов при дрейфе в сторону полосковой структуры. Пробеги фото-электронов зависят, в свою очередь, от энергии падающих рентгеновских квантов.

Энергетический спектр СИ из вигглера с полем 2 Т на входе в детектор показан на рис.7. Расчет сделан с помощью программы ХОР2.0 [7]. На рисунке показаны спектры после прохождения через 3 м воздуха после выхода из вакуумного канала и при прохождении через взрывную камеру, а также после прохождения через образец из взрывчатого вещества толщиной

5 мм и 10 мм. Видно, что в спектре излучения после прохождения через образец толщиной 10 мм, наиболее вероятная энергия составляет примерно 20 кэВ. Средняя энергия в этом спектре также близка к 20 кэВ.

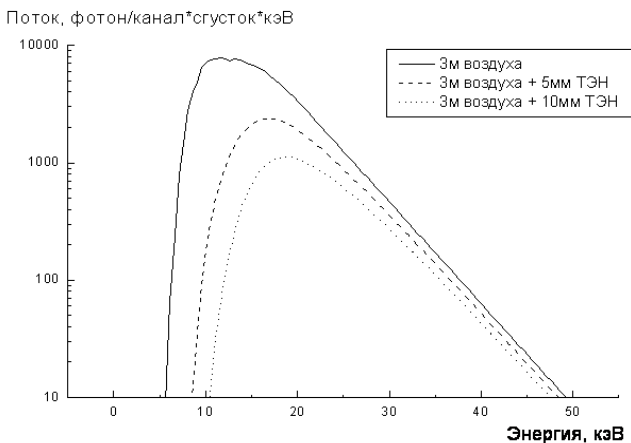


Рис. 7. Энергетические спектры СИ в станции «ВЗРЫВ» на ВЭПП-3. Показан спектр на выходе из вакуумного канала после прохождения 3 м воздуха, а также спектр после прохождения через образец взрывчатого вещества толщиной 5 мм и 10 мм. ТЭН – тетранитропентаэритрит.

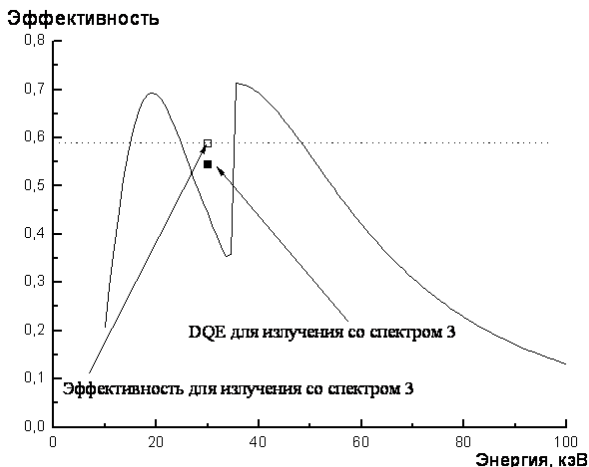


Рис. 8. Зависимость квантовой эффективности детектора от энергии (расчет программой ХОР2.0). При энергии 30 кэВ показаны результаты моделирования эффективности и DQE для пучка фотонов с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3 (см. текст).

Расчетная зависимость квантовой эффективности детектора DIMEX (доли потока фотонов, поглощенных в чувствительной зоне) от энергии рентгеновских фотонов показана на рис.8. Расчет сделан с помощью программы ХОР2.0 для толщины входного окна из углепластика (чистый углерод, плотность 1.2 г/см³) 1 мм, толщины мертвой зоны за входным окном 3мм и толщины чувствительной зоны 30 мм. Рабочая смесь – Хе-СО₂ (3-1) при абсолютном давлении 7атм. Видно, что в диапазоне энергий 15 – 30 кэВ квантовая эффективность составляет более 50%.

Для определения влияния различных физических процессов и параметров детектора на пространственное разрешение было проведено моделирование. Для этого использовался программный пакет FLUKA2006.03 [8,9]. FLUKA – это универсальный пакет для моделирования Монте-Карло, позволяющий проводить транспорт частиц и рассчитывать результаты их взаимодействия с веществом. FLUKA позволяет моделировать с высокой точностью транспорт и взаимодействие с веществом 60 различных частиц, включая фотоны и электроны, начиная с энергии 1 кэВ до тысяч ТэВ.

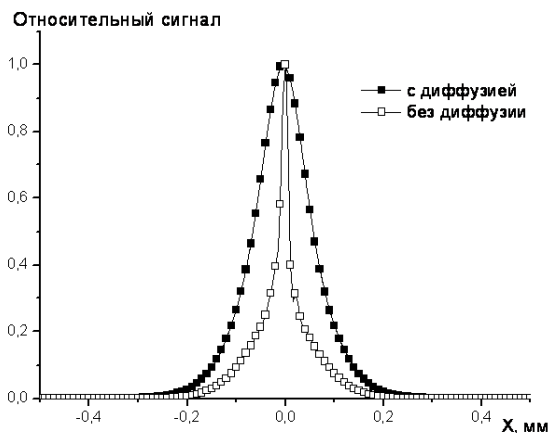


Рис. 9. Распределение заряда в детекторе при облучении его бесконечно узким пучком (результаты моделирования). Показано распределение, полученное без учета диффузии, и с учетом диффузии электронов для энергии фотонов 20 кэВ.

Результат моделирования распределения сигнала в детекторе при облучении его бесконечно узким пучком фотонов с энергией 20 кэВ показан на рис.9. Геометрия детектора и материалы в моделировании взяты такие же, как и при расчете эффективности (см. выше). Результат моделирования не учитывает диффузию электронов во время их дрейфа из промежутка между дрейфовым электродом и ГЭУ к полосковой структуре. Диффузия электронов добавлялась путем свертки полученного распределения с гауссовой функцией с дисперсией, определяемой длиной дрейфа и

коэффициентом диффузии. Длина дрейфа была взята равной 2.5 мм, а коэффициент поперечной диффузии был взят из [10] для смеси Ar-CO₂ (3-1), поскольку данные для смеси Хе-CO₂ (3-1) отсутствуют. Квадратный корень из дисперсии для соответствующего гауссового распределения составил 33 мкм. Распределение сигнала от бесконечно тонкого пучка в детекторе с учетом диффузии также показано на рис.9. Видно, что диффузия электронов вносит основной вклад в пространственное разрешение.

Результат измерения пространственного разрешения представлен на рис.10. На рисунке показана аппаратная функция детектора (изображение бесконечно тонкого пучка), измеренная методом непрозрачного края. При этом в равномерный пучок помещается непрозрачный объект с точно обработанным краем. Изображение края затем дифференцируется и полученное распределение является искомой аппаратной функцией. Из рисунка видно, что ширина функции на половине высоты равна 180 мкм, что хорошо соответствует результату моделирования с учетом диффузии электронов.

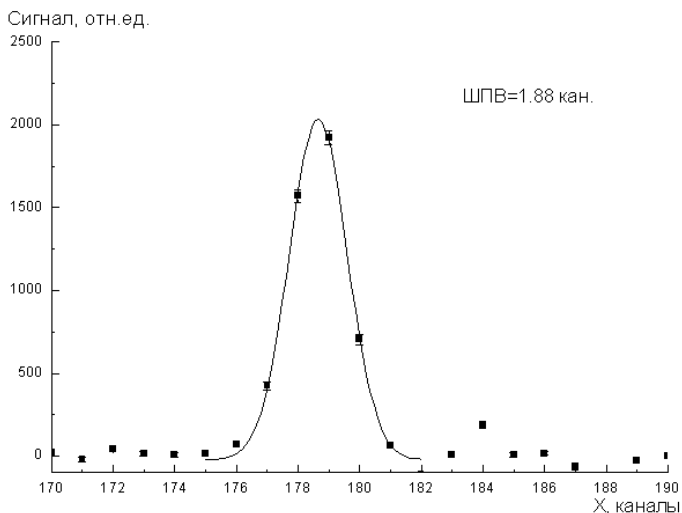


Рис. 10. Сигнал в детекторе от узкого пучка.

2.2. Временное разрешение

Временное разрешение детектора DIMEX определяется временем сбора электронов, дрейфующих через индукционный промежуток. Пользуясь данными из [10] для смеси Ar-CO₂ (3-1) можно сделать вывод, что при величине электрического поля более 1 кВ/см·атм, скорость дрейфа составляет около 5 см/мкс. При этом время дрейфа через промежуток 1.5 мм будет составлять 30 нс. Время сбора электронов также зависит от толщины

пучка СИ и от продольной диффузии, которая составляет не более 0.1 мм (полная ширина распределения). При максимальной толщине пучка СИ 1 мм, время сбора электронов будет не более 50 нс.

На ВЭПП-3 сгустки следуют через 250 нс, а максимальная частота записи в аналоговую память чипа APC128 составляет 10 МГц. Таким образом, единственным способом проверить временное разрешение детектора является регистрация сигнала от СИ через 125 нс, при этом сигнал будет регистрироваться на каждом втором такте. Мерой временного разрешения в этом случае будет являться отношение сигналов, зарегистрированных в двух последовательных тактах.

Результат такого измерения показан на рис.11. На рисунке приведена зависимость сигнала от номера ячейки аналоговой памяти. Запись в память проводилась через 125 нс, причем заряд, накопившийся в емкости обратной связи интеграторов APC128, при этом не сбрасывался. Таким образом, регистрация сигнала от очередного сгустка соответствует увеличению значения сигнала, а отсутствие сгустка во время очередного такта измерения соответствует отсутствию изменения сигнала. На рис.11 видно, что в течение такта, когда сгусток отсутствует, регистрируется не более 5% от полного сигнала (суммы сигналов в 2-х последовательных тактах). Если предположить, что поток электронов спадает экспоненциально со временем, то через 250нс будет зарегистрировано не более $2.5 \cdot 10^{-4}$ от полного сигнала. Это значение соответствует коэффициенту смешивания сигналов от 2-х последовательных сгустков.

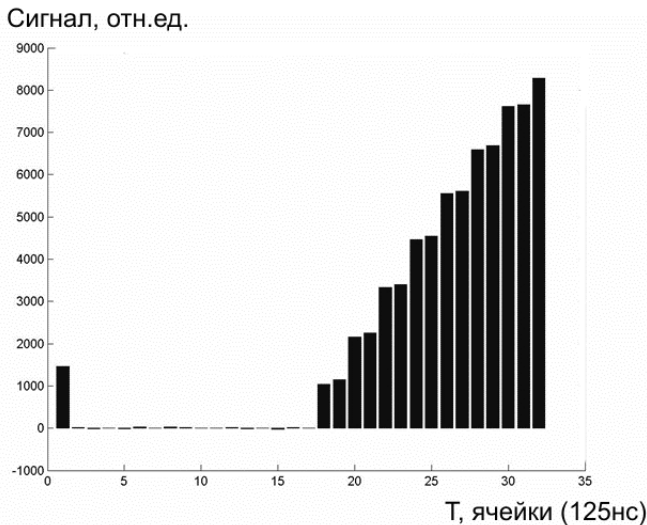


Рис. 11. Зависимость сигнала от номера ячейки аналоговой памяти при такте измерения 125 нс без сброса сигнала между измерениями.

2.3. Точность измерения сигнала. Динамический диапазон

Точность измерения сигнала определяется флуктуациями потока фотонов, регистрируемых детектором, и шумами электроники. На рис.12 приведена зависимость сигнала в детекторе и отношения сигнала к шуму от

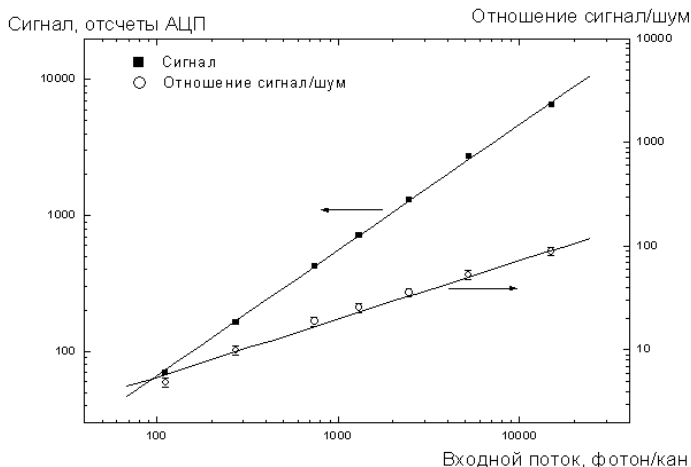


Рис. 12. Зависимость сигнала в детекторе и отношения сигнала к шуму от потока фотонов на входе.

потока фотонов, на входе в детектор. Поток фотонов изменялся с помощью фильтров из плексигласа (ПММА). На графике приведен поток, рассчитанный с помощью программы ХОР2.0. Видно, что сигнал увеличивается прямо пропорционально входному потоку во всем диапазоне измерения. Отношение сигнала к шуму меняется как корень квадратный из сигнала (наклон зависимости в два раза меньше в двойной логарифмической шкале). Таким образом, фактором, определяющим точность измерения сигнала, являются флуктуации числа фотонов, регистрируемых детектором, и наилучшая точность достигается при максимальном сигнале. Предельный сигнал, измеряемый детектором, ограничивается динамическим диапазоном интеграторов АРС128. Поскольку интеграторы насыщаются при определенной величине входного заряда, уменьшая величину заряда, регистрируемого от одного фотона, можно повысить предельный поток фотонов, регистрируемый детектором. Такого эффекта можно достичь, изменяя долю потока электронов, проходящих сквозь ГЭУ, изменяя соотношения величины электрического поля в отверстиях ГЭУ, в дрейфовом и в индукционном промежутках [11]. Следует иметь в виду, что при дальнейшем увеличении потока фотонов, поглощаемого в дрейфовом промежутке, будет проявляться другой существенный эффект, ограничивающий предельный поток, – объемный заряд положительных

ионов. Положительные ионы, накапливающиеся в дрейфовом промежутке, экранируют электрическое поле. Уменьшение величины электрического поля приводит к замедлению дрейфа электронов, к усилению их рекомбинации и, в конечном итоге, к падению сигнала. Для уменьшения этого эффекта следует увеличивать поле в дрейфовом промежутке и инжектировать пучок фотонов как можно ближе к дрейфовому электроду с тем, чтобы уменьшить плотность и толщину слоя ионов.

Из рис.12 видно, что при максимальном сигнале в детекторе отношение сигнал/шум в канале детектора близко к 100, т.е. возможно измерение изменений сигнала на уровне процента. В настоящее время проводится дальнейшее изучение возможности расширения динамического диапазона и улучшения точности измерений описанным выше методом.

3. Применение DIMEX в экспериментах

Ниже приведены примеры двух экспериментов на пучке СИ с использованием детектора DIMEX.

3.1. Томография плотности и поля течения продуктов детонации с использованием СИ

Методы томографии плотности статических объектов в настоящее время успешно развиты. Для динамически изменяющихся объектов с меньшим успехом они применяются как в газовой динамике и физике плазмы для определения температуры и плотности [15], так и в импульсной рентгенографии плотности [16]. Почти всегда в таких задачах нет возможности получить экспериментальные данные, снятые с нескольких ракурсов и с хорошей точностью. Поэтому выбор алгоритма восстановления, устойчивого к ошибкам, и позволяющего эффективно использовать априорную информацию об исследуемом объекте, принципиально важен для качественного восстановления плотности.

Использование ВЭПП-3 в качестве источника излучения (с его большим потоком рентгеновских квантов) и детектора DIMEX в виде приемника позволяет проводить взрывные эксперименты с наносекундной экспозицией и с пространственным разрешением ~ 100 мкм.

Методика таких экспериментов описана в работах [12. 13]. Для определения пространственного распределения плотности в продуктах детонации цилиндрического заряда ВВ (взрывчатое вещество) в конкретном сечении последовательно фиксировалась рентгеновская тень от детонирующего заряда с шагом между кадрами 0.5 мкс (рис. 13).

По ослаблению потока рентгеновского излучения, с использованием соответствующей калибровки, определялось количество просвеченной массы вдоль луча.

В этих же работах был предложен и реализован метод восстановления плотности по фиксируемой рентгеновской тени от исследуемого объекта, основанный на регуляризации, использующий априорную информацию о виде искомой функции. Этот метод позволяет добиться хорошей точности восстановления распределения $\rho(r,z)$. С его использованием было восстановлено пространственное распределение плотности $\rho(r,z)$ разлетающихся продуктов взрыва ТНТ (тринитротолуол), показанное на рис. 14.

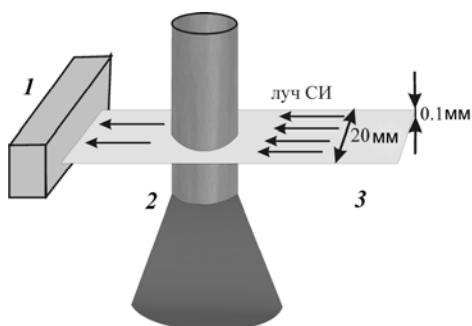


Рис. 13. Схема проведения рентгенографического эксперимента: 1 – детектор DIMEX, 2 – исследуемый заряд взрывчатого вещества, 3 – луч синхротронного излучения.

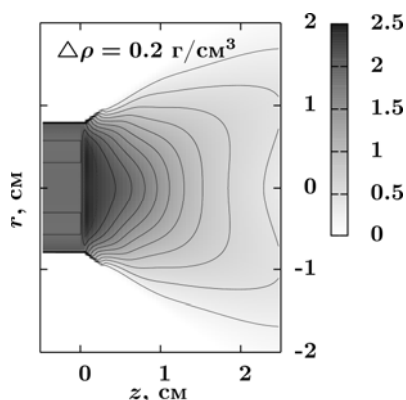


Рис. 14. Пространственное распределение плотности (ρ , г/см³), измеренное с помощью детектора DIMEX, заряд – ТНТ.

В работе [14] приведены данные по томографии продуктов детонации прессованных зарядов из ТНТ с начальной плотностью 1.6 г/см^3 , скоростью детонации $D = 7.0 \text{ км/с}$. Диаметр зарядов составлял 15 мм, расстояние от инициируемого торца до сечения, в котором проводились измерения, 60 мм. Инициирование осуществлялось генератором плоской волны. Так как процесс стационарен, при представлении данных используется связь между временем t и пространственной координатой $z = Dt$.

Зная распределение плотности $\rho(r,z)$, можно поставить задачу о восстановлении остальных параметров течения, то есть полей вектора массовой скорости и давления. Для её решения можно использовать систему уравнений стационарной газовой динамики (1, 2):

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho v \vec{v}) + \nabla p = 0. \quad (2)$$

При этом не используется уравнение сохранения энергии и не требуется знание уравнения состояния продуктов детонации. Такая постановка является нетрадиционной для решения задач газовой динамики и, вообще говоря, необходим анализ возможной корректной постановки задачи. В рассматриваемом случае проблема упрощается, так как в стационарном случае течение является потенциальным. В этом случае система (1), (2) распадается на два независимых уравнения, которые решаются последовательно. Примеры полученных полей скоростей и давлений для ТГ 50/50 приведены в [14].

3.2. Эксперименты по измерению сигнала МУРР

Малоугловое рассеяние дает информацию о распределении флуктуаций электронной плотности в образце. С практической точки зрения это эффективный инструмент для выяснения характерных размеров частиц и распределения частиц по размерам в исследуемом объекте. Типичная схема эксперимента по регистрации МУРР показана на рис.15. Из пучка СИ с помощью нижнего (K1) и верхнего (K2) ножей (коллиматор Кратки) на центральной части заряда ВВ формируется пятно размером $0.4 \div 1$ мм высотой и $3 \div 20$ мм шириной. Перед детектором прямой пучок закрывается еще одним нижним ножом (K3). Отклоненные лучи МУРР регистрируются детектором. Для дополнительного контроля на детектор также попадала через фильтр часть прямого пучка (через медную пластину толщиной 1 мм).

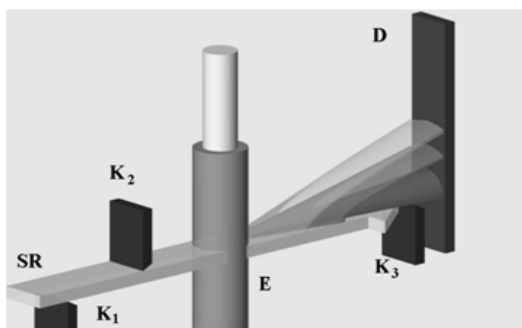


Рис. 15. Схема проведения эксперимента по регистрации МУРР.

Расстояние между ножами (K1) и (K2) составляет ~ 200 мм, расстояние между ножом K2 и зарядом ВВ – ~ 700 мм, между зарядом и ножом K3 – ~ 640 мм, между ножом K3 и детектором – ~ 260 мм. Угловой диапазон измерений МУРР составляет $\sim 4 \cdot 10^{-4} \div 10^{-2}$ рад. Такой диапазон измерений позволяет регистрировать МУРР от частиц размером $\sim 1 \div 100$ нм.

Результат одного из экспериментов по регистрации МУРР показан на рис.16 [17]. На рисунке представлен набор измерений пространственного распределения потока фотонов СИ, при этом каждое последующее

измерение отстоит по времени от предыдущего на 0.5 мкс. На графике по осям отложены координата вдоль детектора в каналах (0.1 мм), время в мкс и поток фотонов. Измерение, соответствующее моменту 3.0 мкс соответствует прохождению детонационной волны. Видно, что в течение первой микросекунды после прохождения детонационной волны, начинается образование наночастиц (наноалмазов [17]), которое нарастает в течение последующих 4 мкс. По форме распределения МУРР можно рассчитать средний размер наночастиц в образце.

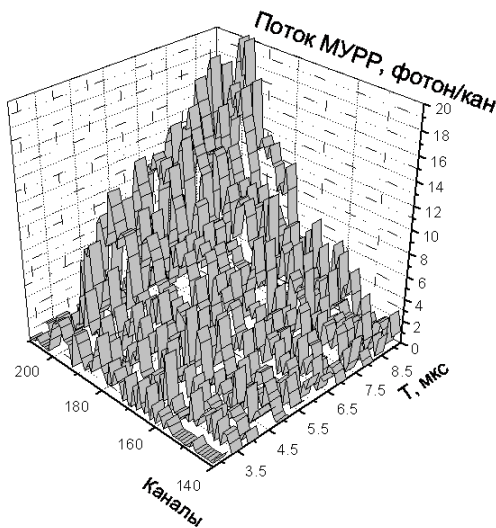


Рис. 16. Результат эксперимента по измерению МУРР от взрывающегося образца.

4. Возможности применения DIMEX на ВЭПП-4М

В настоящее время DIMEX работает на пучке СИ из вигглера с полем 2 Т на накопителе ВЭПП-3 с энергией пучка 2 ГэВ. Средняя энергия фотонов в пучке составляет около 20 кэВ после прохождения через бериллиевые окна общей толщиной 5мм и объект из взрывчатого вещества толщиной 1 см. Эта сравнительно низкая энергия не дает возможности использовать в экспериментах более толстые образцы из-за значительного поглощения пучка фотонов и, как следствие, ограничения по точности измерения плотности вещества. Пучок более высокой энергии может быть получен на накопителе ВЭПП-4М с вигглером 1.3 Т, разрабатываемом в настоящее время. Для оценки параметров детектора при переходе на пучок на ВЭПП-4М было проведено моделирование с использованием пакета FLUKA2006.3.

Предполагаемый энергетический спектр СИ из 5-полюсного вигглера с полем 1.3 Т на ВЭПП-4М при энергии пучка 4 ГэВ показан на рис.17.

На рисунке приведен спектр на выходе из канала, после прохождения через бериллиевые окна общей толщиной 5мм и после прохождения через объект из взрывчатого вещества толщиной 20 мм. В качестве материала объекта был взят чистый углерод с плотностью 1.6 г/см³. Далее мы будем ссылаться на этот спектр, как спектр 3. Видно, что максимум спектра 3 находится на энергии 30 кэВ, спектральная плотность падает в 2 раза при энергии ~50 кэВ и более, чем в 10 раз, при энергии 100 кэВ.

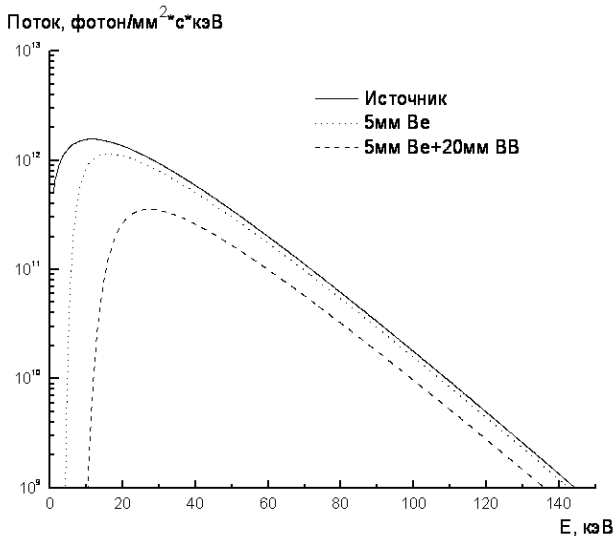


Рис. 17. Спектры СИ из 5-полюсного вигглера с полем 1.3Т при энергии электронов 4 ГэВ. Показаны спектр на выходе из канала, спектр после прохождения через бериллиевые окна на выходе из канала, в блоке коллиматоров и во взрывной камере, а также спектр после прохождения через образец взрывчатого вещества толщиной 20 мм.

Квантовая эффективность (доля поглощенного потока) для спектра 3 была получена моделированием. При этом на модель детектора, представляющую собой расположенные последовательно слой углерода с плотностью 1.2 г/см³ и толщиной 1 мм, слой смеси Хе-СО₂ (3-1) под давлением 7 атм толщиной 3 мм и слой этой же смеси толщиной 30 мм и высотой 1 мм, в котором регистрировался заряд от поглощенных фотонов, падал равномерный поток фотонов, распределенных по энергии согласно спектру 3. Доля поглощенного потока определялась, как отношение количества фотонов, поглощенных в рабочем слое газа 30 мм, к падающему потоку фотонов. Полученное значение показано точкой при энергии 30 кэВ (максимум на спектре 3) на рис.8.

Вероятность поглощения фотона в чувствительном объеме детектора не является полной характеристикой интегрирующего детектора, каковым

является DIMEX. Эта величина не учитывает источники шумов, отличные от Пуассоновских флуктуаций поглощенного потока, например, флуктуации энергии поглощенного фотона. Более полной характеристикой детектора является квантовая эффективность регистрации (Detective Quantum Efficiency, DQE) [18-20]. DQE определяется, как

$$DQE = \frac{SNR_{out}^2}{SNR_{in}^2}, \quad (3)$$

где SNR_{out} – отношение сигнала к шуму, регистрируемое детектором, а SNR_{in} – отношение сигнала к шуму во входном потоке фотонов. Для экспериментального измерения и моделирования величины DQE необходимо выразить ее через измеряемые параметры. При этом общепринятым является выражение всех характеристик в пространственно-частотной области, т.е. через фурье-образы пространственных функций. При таком способе представления характеристики сложных систем раскладываются на отдельные сомножители, которые могут быть проанализированы независимо друг от друга.

Фурье-образ сигнала на выходе детектора может быть записан, как $\bar{q} T(u)$, где \bar{q} – среднее значение входного потока фотонов, а T – характеристическая функция, описывающая перевод входного потока в выходной сигнал в зависимости от пространственной частоты u . Тогда отношение сигнала к шуму на выходе детектора может быть записано в виде

$$SNR_{out}^2 = \frac{|\bar{q}T(u)|^2}{NPS(u)}, \quad (4)$$

где $NPS(u)$ – это спектр мощности шума или Фурье-преобразование от автокорреляционной функции

$$NPS(u) = F\{K(x)\}, \quad (5)$$

а

$$K(x) = \lim_{X \rightarrow \infty} \frac{1}{X} \int_X \Delta a(x') \Delta a(x' + x) dx'. \quad (6)$$

Входной сигнал равен среднему значению потока фотонов \bar{q} , а входной шум равен среднеквадратичному отклонению входного потока или $\sqrt{\bar{q}}$.

Таким образом,

$$SNR_{in}^2 = \bar{q}, \quad (7)$$

а

$$DQE(u) = \frac{q|T(u)|^2}{NPS(u)}. \quad (8)$$

Значение DQE при нулевой пространственной частоте является удобной величиной для того, чтобы характеризовать детектор одним числом. При нулевой частоте спектр мощности шума может быть записан в виде

$$NPS(0) = \int_{-\infty}^{\infty} K(x)dx = X_{corr} K(0), \quad (9)$$

где X_{corr} обычно называют длиной корреляции. Величина $K(0)$ равна дисперсии сигнала на изображении σ^2 , следовательно

$$NPS(0) = \sigma^2 X_{corr} \quad (10)$$

и

$$DQE(0) = \frac{|\bar{q}T(u)|^2}{\bar{q}X_{corr}\sigma^2} = \frac{SNR_{im}^2}{\bar{q}X_{corr}}. \quad (11)$$

Здесь SNR_{im}^2 – отношение сигнала к шуму на изображении без учета пространственных корреляций шума. Таким образом, DQE может быть вычислена через параметры, определяемые по изображению, полученному с помощью детектора.

Для вычисления DQE было проведено моделирование распределения энергии, выделенной в детекторе, перпендикулярно направлению полосок считывающей структуры, т.е. вдоль длины входного окна. Равномерный поток фотонов падал на детектор в зоне длиной 1 см вдоль входного окна. Весь участок был поделен на 200 интервалов по 50 мкм. Было вычислено среднее значение и среднеквадратичное отклонение энергии, выделенной в этих интервалах. Отношение сигнала к шуму на изображении было рассчитано как отношение среднего значения к среднеквадратичному отклонению выделенной энергии. Для моделирования автокорреляционной функции был использован бесконечно тонкий пучок фотонов и получена аппаратная функция. Автокорреляционная функция совпадает с аппаратной функцией во второй степени. В результате моделирования получено значение эффективности равное 59% и DQE равное 48%. Значение DQE меньше, чем вероятность поглощения фотонов, поскольку в ней учитывается также флуктуации энергии выделяемой при поглощении фотона.

Результаты моделирования пространственного разрешения детектора приведены на рис.18-21. На рис.18 демонстрируется влияние давления газа на пространственное разрешение. Основным фактором, определяющим пространственное разрешение является диффузия электронов, которая обратно пропорциональна квадратному корню из давления. Соответственно изменение аппаратной функции при изменении давления от 7 атм до 10 атм пренебрежимо мало. Дальнейшее повышение давления сложно технически, так как требует соответствующего повышения высокого напряжения на электродах детектора (для сохранения скорости дрейфа электронов).

Сравнение аппаратной функции для пучков фотонов различной энергии приводится на рис.19. Здесь сравнивается пространственное разрешение для фотонов с энергией 20 кэВ и 50 кэВ (без диффузии). Видно, что в этом диапазоне энергий изменение аппаратной функции мало. Действительно, основной вклад в размазывание аппаратной функции дают фотоэлектроны, энергия которых при обоих значениях энергии фотона примерно равна 15 кэВ. Пробег такого электрона в смеси Хе-СО₂ (3-1) под давлением 7 атм в среднем равен ~100 мкм [21].

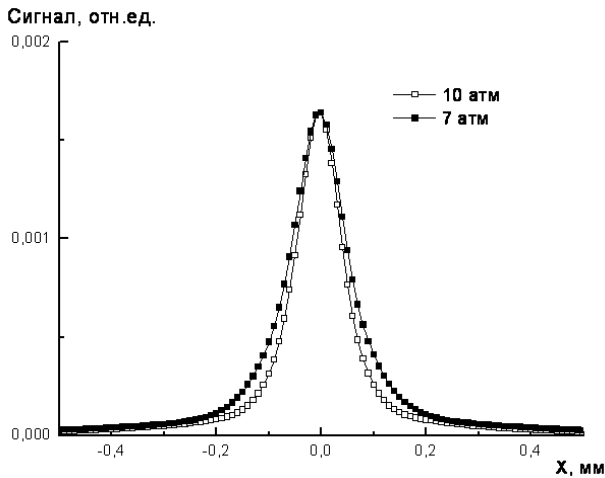


Рис. 18. Сравнение аппаратных функций при давлении газа в детекторе 7 атм и 10 атм. Энергия фотонов 50 кэВ.

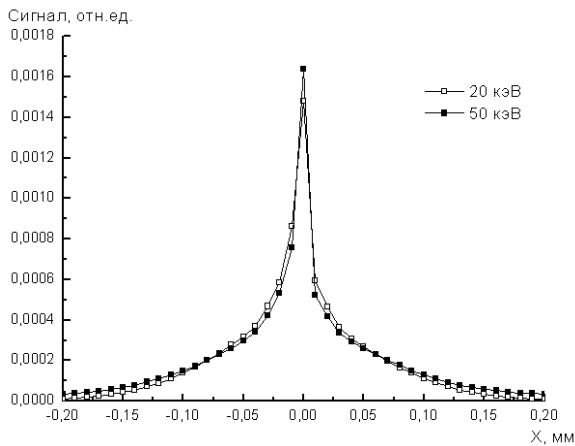


Рис. 19. Сравнение аппаратных функций без учета диффузии при энергии 20 кэВ и 50 кэВ.

Пространственное разрешение для фотонов с распределением по энергии, соответствующем спектру 3, приведено на рис.20. На рисунке также приведена для сравнения аппаратная функция для фотонов с энергией 20 кэВ. Обе аппаратные функции рассчитаны при отсутствии диффузии для лучшего выделения эффекта различной энергии фотонов. Из рис.20 видно, что аппаратная функция для 20 кэВ фотонов шире в центральной части, что связано с образованием большого количества низкоэнергетических фотоэлектронов от пучка с распределением соответствующем спектру 3. Действительно, как видно из рис.17, спектральная плотность в спектре 3 при энергии выше максимума (~30 кэВ) спадает медленно, и при энергии выше К-края ксенона (~35 кэВ) спектральная плотность достаточно велика, что приводит к образованию большого количества фотоэлектронов с низкой энергией, имеющих очень малый пробег и дающих высокую плотность ионизации в точке падения пучка. С другой стороны аппаратная функция для спектра 3 имеет длинные «хвосты», которые определяются наличием фотоэлектронов высокой энергии от части спектра чуть ниже К-края ксенона, где поглощение фотонов идет на L-крае, а также от высокоэнергетической части спектра.

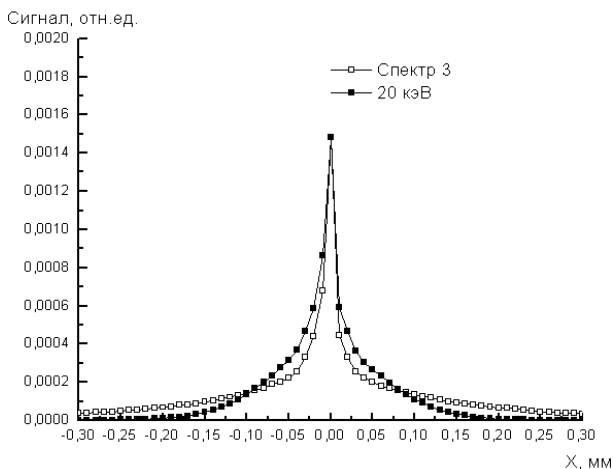


Рис. 20. Сравнение аппаратных функций без учета диффузии для энергий 20 кэВ и для энергетического распределения, соответствующего спектру 3.

На рис.21 сравнивается полная аппаратная функция с учетом диффузии для пучка с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3 и фотонов с энергией 20 кэВ. Видно, что ширина на полувысоте обеих распределений практически совпадает, хотя распределение для спектра 3 имеет более выраженные «хвосты». Ширина на полувысоте в обоих случаях близка к 170 мкм, что хорошо соответствует экспериментальному результату, полученному на ВЭПП-3 (рис.10).

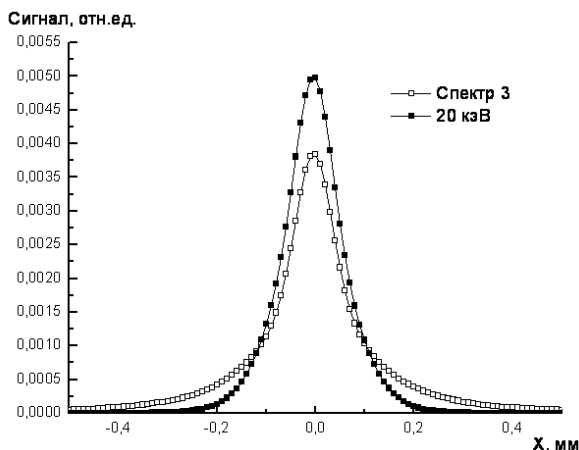


Рис. 21. Сравнение пространственного разрешения для энергии фотонов 20 кэВ и для пучка с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3.

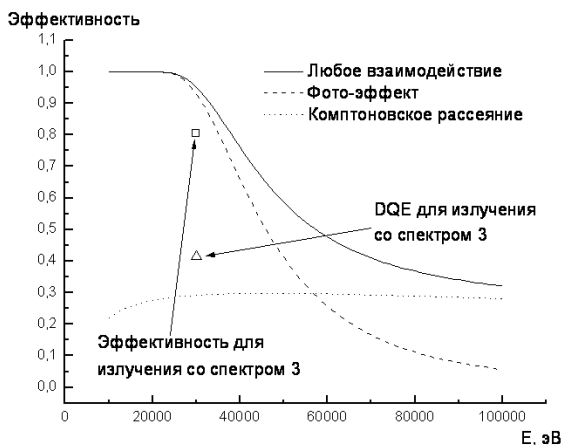


Рис. 22. Вероятность взаимодействия фотонов с материалом кремниевого детектора длиной 1 см и толщиной 0.3 мм. Показана зависимость вероятности однократного комптоновского рассеяния, поглощения и полной вероятности взаимодействия от энергии. Также показан результат моделирования вероятности взаимодействия и DQE для пучка с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3.

Альтернативой газовому может быть твердотельный детектор. Для изучения свойств возможного альтернативного варианта технологии было проведено моделирование для кремниевого детектора длиной в направлении пучка 1 см и толщиной 300 мкм. На рис.22 показаны вероятность

комптоновского рассеяния (хотя бы один раз), вероятность поглощения (фото-эффект), а также полная вероятность взаимодействия фотона в материале детектора в зависимости от энергии. Ниже 30 кэВ вероятность поглощения фотона близка к 1, тогда как вероятность комптоновского рассеяния составляет около 30% в диапазоне от 20 кэВ до 100 кэВ. На рисунке также показаны вероятность взаимодействия фотонов с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3 и DQE для этого распределения.

Поскольку комптоновское рассеяние приводит к выделению энергии с помощью электрона отдачи, этот процесс учитывался при вычислении эффективности. Энергия выделяемая в этом процессе в среднем существенно меньше, чем при поглощении фотона, что приводит к дополнительным флуктуациям энергии и снижению величины DQE. Эффективность (вероятность взаимодействия) для фотонов с энергетическим распределением по спектру 3 равна ~81%, тогда как DQE составляет ~42%.

Пространственное разрешение кремниевого детектора существенно лучше, чем газового варианта DIMEX. Аппаратная функция для кремниевого детектора, полученная моделированием для пучка фотонов с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3, показана на рис.23. Видно, что ширина на полувысоте полученного распределения составляет около 20 мкм.

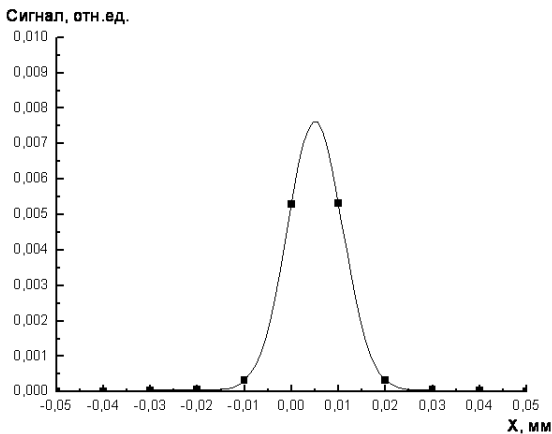


Рис. 23. Пространственное разрешение кремниевого детектора для пучка СИ с энергетическим распределением, соответствующим спектру 3.

Заключение

Более, чем 6-летний опыт работы детектора DIMEX на канале СИ ВЭПП-3 показал значительные возможности метода отдельной регистрации излучения отдельных сгустков, как при непосредственном просвечивании образца (рентгенографии), так и при регистрации МУРР. Существующий

детектор позволяет регистрировать СИ со средней энергией 20 кэВ с пространственным разрешением ~ 0.2 мм (ширина на полувысоте), максимальной точностью $\sim 1\%$ (максимальное отношение сигнал/шум ~ 100) и с временным разрешением, соответствующим коэффициенту смешивания сигнала от соседних сгустков не более $2.5 \cdot 10^{-4}$.

Несмотря на успешную работу на канале ВЭПП-3 желательнее дальнейшее усовершенствование детектора, улучшение его характеристик. Разработка вигглера с полем 1.3 Т на ВЭПП-4М и строительство соответствующего канала СИ даст возможность повысить энергию и интенсивность пучка, что позволит проводить эксперименты с более толстыми образцами. Моделирование, проведенное в настоящей работе, показывает, что детектор не изменит существенно своих характеристик, его пространственное разрешение останется около 0.2 мм и DQE составит $\sim 50\%$.

Пространственное разрешение и максимальный поток фотонов (максимальное отношение сигнал/шум), который может зарегистрировать существующий детектор, ограничены газовой технологией. Существенного продвижения в улучшении этих параметров можно достичь применением твердотельной технологии. Кремниевый микрополосковый детектор может быть применен для этой методики, если его расположить под малым углом к пучку, так что длина пересечения пучком детектора составит не менее 10 мм. В этом случае эффективность регистрации фотонов (DQE) будет достаточно высокой ($\sim 42\%$), тогда как пространственное разрешение может быть на порядок лучше, чем в газовом DIMEX (~ 20 мкм). Конечно, достичь такого разрешения можно будет только при соответствующей сегментации считывающих электродов.

В настоящее время начаты работы по экспериментальному изучению свойств такого детектора. Следует отметить, что этот вариант детектора требует полной переработки регистрирующей электроники, а также тщательного анализа возможных эффектов радиационного повреждения кремния при облучении интенсивным «белым» пучком СИ.

Литература

- [1] *V. Aulchenko, P. Papishev, S. Ponomarev, L. Shekhtman and V. Zhulanov.* // *J. Synchrotron Rad.*, **10** (2003) 361.
- [2] *V. Aulchenko, S.Ponomarev, L.Shekhtman et al.* // *Nucl. Instrum. Meth. A* **513** (2003) 388.
- [3] *V.M. Aulchenko, O.V. Evdokov, L.I. Shekhtman, et.al.* // *J. Instr.*, **3** (2008), P05005.
- [4] *Sauli F.* // *Nucl. Instrum. Meth.*, **A386** (1997). p.531-534.
- [5] *Бузулуцков А.Ф.* Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей (обзор). // *Приб. и техн. Экспер.*, 2007, N3, с.5-30.

- [6] *R. Horisberger and D. Pitzl*. A novel readout chip for silicon strip detectors with analog pipeline and digitally controlled analog signal processing. // Nucl. Instrum. Meth., **A 326** (1993) 92.
- [7] <http://www.esrf.eu/computing/scientific/xop2.0/>
- [8] *A. Fassó, A. Ferrari, J. Ranft and P.R. Sala*. FLUKA: a multi-particle transport code. - CERN-2005-10, INFN/TC-05/11, SLAC-R-773 (2005).
- [9] *A. Fassó et al.* The physics models of FLUKA: status and recent developments. // Computing in High Energy and Nuclear Physics 2003 Conference (CHEP2003), La Jolla, CA, USA, March 24-28, 2003. - <http://nicadd.niu.edu/~jeremy/lcd/doc/chep/03/SimAndModeling/MOMT005.PDF>, *eConf C0303241* (2003)MOMT005 [hep-ph/0306267].
- [10] Properties of some gas mixtures used in tracking detectors, *A. Sharma, R.Veenhof*. - <http://consult.cern.ch/writeup/garfield/examples/gas/trans2000.html>.
- [11] *S. Bachmann, A. Bressan, L. Ropelewski, F. Sauli, A. Sharma, D. Mörmann*. Charge amplification and transfer processes in the gas electron multiplier. // Nucl. Instrum. Meth., **A 438** (1999) 376.
- [12] Распределение плотности разлетающихся продуктов стационарной детонации тротила, *Э.Р. Пруэл, Л.А. Мерзиевский, К.А. Тен, П.И. Зубков, Л.А. Лукьянчиков, Б.П. Толочко, А.Н. Козырев, В.В. Лутвенко*. // Физика горения и взрыва, 2007, т.43, N3, с.121–131.
- [13] High-speed X-ray transmission tomography for detonation investigation, *O. V. Evdokov, A. N. Kozurev, V. V. Litvinenko, L. A. Lukianchikov, L. A. Merzhievsky, E. R. Prueel, K. A. Ten, B. P. Tolochko, I. L. Zhogin, P. I. Zubkov*. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575 (2007) 116–120.
- [14] Tomography of the flow field of detonation product using SR, *K.A. Ten, E.R. Prueel, L.A. Merzhievsky, L.A. Lukjanchikov, B.P. Tolochko, I.L. Zhogin, L.I. Shekhtman*. // NIM, A 603 (2009) 160–163.
- [15] *В. В. Пикалов, Н. Г. Преображенский*. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. // Издательство Наука, Сибирское отделение, 1987.
- [16] *В.Н. Козловский*. Информация в импульсной рентгенографии. - Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006.
- [17] *V.M. Titov, B.P. Tolochko, K.A. Ten, L.A. Lukyanchikov, E. R. Prueel*. Where and when are nanodiamonds formed under explosion? // Diam. Relat. Mater., **16** (2007) 2009.
- [18] *J.C. Dainty and R. Shaw*. Image Science: principles, analysis, and evaluation of photographic-type imaging processes. - Academic Press (1974).
- [19] *J. Beutel, H.L. Kundel and R.L. Van Metter*. Handbook of Medical Imaging. Volume 1. // Physics and Psychophysics, SPIE Press (2000).
- [20] Влияние корреляции шумов в каналах цифрового рентгеновского приёмника-преобразователя на оценку квантовой эффективности регистрации, *Поросев В.В., Шехтман Л.И., Зеликман М.И., Блинов Н.Н.(мл.)*. // Медицинская техника, N5 (сентябрь-октябрь 2004).
- [21] *T. Tabata et al.* Generalized semiempirical equations for the extrapolated range of electrons. // Nucl. Instrum. Meth., **103** (1972) 85.

В.М. Аульченко, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин,
В.В. Жуланов, Э.Р. Прууэл, Б.П. Толочко,
К.А. Тэн, Л.И. Шехтман

**Детектор для изучения взрывных процессов
на пучке синхротронного излучения**

*V.M. Aulchenko, O.V. Evdokov, I.L. Zhogin,
V.V. Zhulanov, E.R. Prueel, B.P. Tolochko,
K.A. Ten, L.I. Shekhtman*

**Detector for studing of the explosive processes
on the synchrotron radiation beam**

ИЯФ 2009-22

Ответственный за выпуск А.В. Васильев
Работа поступила 1.10. 2009 г.

Сдано в набор 1.110. 2009 г.
Подписано в печать 2.10. 2009 г.
Формат 60х90 1/16 Объем 1.7 печ.л., 1.4 уч.-изд.л.
Тираж 105 экз. Бесплатно. Заказ № 22

Обработано на РС и отпечатано
на ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11